



⑬ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Gebrauchsmuster**
⑩ **DE 298 22 090 U 1**

⑤ Int. Cl.⁶:
H 01 S 3/08
H 01 S 3/225

⑦	Aktenzeichen:	298 22 090.3
⑧	Anmeldetag:	10. 12. 98
⑨	Eintragungstag:	11. 2. 99
④	Bekanntmachung im Patentblatt:	25. 3. 99

DE 298 22 090 U 1

⑭ Inhaber:
Lambda Physik Gesellschaft zur Herstellung von
Lasern mbH, 37079 Göttingen, DE

⑮ Vertreter:
WUESTHOFF & WUESTHOFF Patent- und
Rechtsanwälte, 81541 München

⑥ Laser zur Erzeugung schmalbandiger Strahlung

DE 298 22 090 U 1

10.12.98

1G-81 274
LAMBDA PHYSIK

Laser zur Erzeugung schmalbandiger Strahlung

Die Erfindung betrifft einen Laser zur Erzeugung schmalbandiger Strahlung mit einem laseraktiven Bereich, einem Auskoppelspiegel, einem Strahlaufweiter und einem wellenlängenselektiven Element, auf das Strahlung trifft.

Insbesondere betrifft die Erfindung Excimerlaser der vorstehend genannten Art.

Die Erfindung befaßt sich mit dem Problem, bei einem solchen Laser möglichst schmalbandige Strahlung mit hoher Stabilität zu erzeugen. Dies ist insbesondere beim Einsatz in der Fotolithographie zur Erzeugung integrierter Schaltungen wichtig. Hierzu sind Wellenlängen < 250 nm erforderlich, um Strukturen mit Abmessungen $< 0,25$ μ m zu erzeugen (für Strukturen mit Abmessungen $< 0,18$ μ m sind Wellenlängen < 200 nm erforderlich). In solchen Wellenlängenbereichen sind achromatisch abbildende Optiken kaum herstellbar. Deshalb muß die verwendete Strahlung sehr schmalbandig sein, um die Abbildungsfehler aufgrund der chromatischen Aberration klein zu halten. Im Einsatzbereich der Fotolithographie, um die es bei der vorliegenden Erfindung insbesondere geht, sind für brechende Abbildungsoptiken Bandbreiten im Bereich $< 0,6$ pm akzeptabel.

Eine andere wichtige Strahlungseigenschaft bei solchen Verwendungen der Strahlung ist die sogenannte spektrale Reinheit. Die spektrale Reinheit der Strahlung kann z.B. durch dasjenige Wellenlängenintervall angegeben werden, in dem 95 % der gesamten Pulsenergie liegt. Die Bandbreite und in noch höherem Maß die spektrale Reinheit der Strahlung werden u.a. bestimmt durch die Divergenz θ oder auch durch die Wellenfrontkrümmung R des Strahls. Fig. 1 zeigt schematisch einen herkömmlichen Excimerlaser mit einem laseraktiven Bereich 1 (also dem Plasma einer Gasentladung), einem Auskoppelspiegel 2, einem Strahlaufweiter 3

und einem wellenlängenselektiven Element 5 in Form eines Gitters. Das strahlaufweitende Element 3 dient zur Verringerung der Divergenz und zur Verringerung der Wellenfrontkrümmung vor dem wellenlängenselektiven Element 5. Fig. 2 zeigt schematisch einen Strahl, wobei der Randstrahl (und Radius) mit R bezeichnet ist. OA ist die optische Achse und θ ist der Divergenzwinkel. Für den Abstand h des Randpunktes der Wellenfront von der optischen Achse OA gilt ohne Verwendung eines Strahlaufweiters $\theta = h/R$. Dies ist in Fig. 2 links dargestellt. In Fig. 2 rechts ist der Strahl bei Verwendung eines Strahlaufweiters gezeigt, wobei der Aufweitungsfaktor M ist. Dann gilt: $h' = M \cdot h$; $\theta' = \theta/M$, und $R' = M^2 \cdot R$.

Der Stand der Technik kennt bereits einen Versuch, eine Wellenfrontkrümmung zu kompensieren (U.S. Patent 5,095,492; R.L. Sandstrom). Dort wird das Gitter verändert, was jedoch Nachteile hat, insbesondere hinsichtlich des Ausmaßes, in dem eine Wellenfrontkrümmung korrigiert werden kann. In einer U.S. Patentanmeldung (Erfinder: D. Basting und S. Govorkov) wird zur Kompensation einer Wellenfrontkrümmung eine zusätzliche Zylinderlinse in den Laserresonator eingesetzt (U.S. Anmeldung vom 22.6.1998).

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen Laser der eingangs genannten Art so auszugestalten, daß mit einfachen und zuverlässigen Mitteln eine Korrektur der Wellenfrontkrümmung möglich ist, und weiterhin der Status der Wellenfrontverzerrung kontrolliert werden kann.

Die Erfindung erreicht diese Ziele durch Einrichtungen zum Einstellen der Wellenfront, also insbesondere zum Korrigieren und Ändern der Wellenfrontkrümmung, wobei die Einrichtungen ein optisches Element aufweisen, dessen optische Eigenschaften veränderbar sind. Eine solche Einrichtung ist z.B. ein veränderbarer, insbesondere verformbarer Spiegel.

Eine Variante der Erfindung erreicht die oben genannten Ziele durch Einrichtungen zum Messen einer Wellenfront und zum Abgeben eines Meßergebnisses sowie durch Einrichtungen zum Einstellen der Wellenfront entsprechend dem Meßergebnis. Diese Ausgestal-

tung der Erfindung eignet sich besonders zur Einrichtung eines geschlossenen Regelkreises, bei dem die Wellenfront durch Messung jeweils auf einen optimalen Wert, d.h. einen Wert mit möglichst geringer Wellenfrontkrümmung, geregelt wird.

Der Erfindungsgedanke läßt sich also sowohl statisch mit auf für ein gegebenes Lasersystem optimal (fest) eingestellten optischen Elementen verwirklichen als auch (in einer fortgeschritteneren Ausgestaltung) dynamisch durch Messung der Wellenfrontkrümmung und entsprechender Einstellung einer Wellenfrontkorrektur, insbesondere in Form eines Regelkreises.

Die Erfindung ermöglicht also die Herstellung einer Wellenfront mit einer möglichst geringen Krümmung, insbesondere unmittelbar vor dem Auftreffen auf das wellenlängenselektive Element. Bei dem wellenlängenselektiven Element kann es sich bevorzugt um ein Gitter handeln, es kommen aber auch andere Einrichtungen in Betracht, die dem Fachmann bekannt sind.

Bei Verwendung eines ebenen Gitters als wellenlängenselektives Element wird die höchste spektrale Reinheit dann erreicht, wenn die Wellenfront keine Krümmung aufweist, also sich der Krümmungsradius R' (Fig. 2, rechts) gegen Unendlich nähert. Bei praktischen Lasersystemen läßt sich eine Wellenfrontkrümmung aus mehreren Gründen nicht vermeiden, so daß die oben genannten erfindungsgemäßen Korrektureinrichtungen für die Erzeugung schmalbandiger Strahlung erforderlich sind. Die Ursachen der Wellenfrontkrümmung sind insbesondere darin zu sehen, daß Strahlen, die nicht exakt parallel zur optischen Achse des Lasers verlaufen, auch in dem Resonator verstärkt werden, daß die optischen Komponenten in aller Regel nicht völlig ebene Oberflächen haben, daß im Volumen der optischen Komponenten Änderungen des Brechungsindex auftreten können, und daß die Strahlung selbst Änderungen des Brechungsindex im Volumen der optischen Komponenten erzeugen kann.

Als optisches Element, dessen optische Abbildungseigenschaften zur Korrektur einer Wellenfrontkrümmung veränderbar sind, kommt bei den oben genannten erfindungsgemäßen Einrichtungen insbesondere ein Spiegel in Betracht, der verformbar ist.

Weitere bevorzugte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den abhängigen Schutzansprüchen beschrieben.

Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der schematischen Zeichnungen erläutert. Es zeigt:

- Fig. 1 einen herkömmlichen Aufbau eines Excimerlasers;
- Fig. 2 Laserstrahlen mit hier interessierenden Parametern, wie sie oben erläutert sind, links ohne und rechts mit Strahlaufweitung,
- Fig. 3 ein erstes Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Lasers;
- Fig. 4 eine Abwandlung der Einrichtungen zur Wellenfrontkorrektur bei einem Lasersystem gemäß Fig. 3;
- Fig. 5 und 6 Beispiele für eine Fernfeld-Intensitätsverteilung, nämlich ohne Wellenfrontkorrektur (Fig. 5) und mit Wellenfrontkorrektur (Fig. 6);
- Fig. 7 und 8 zeigen beispielhaft gemessene Spektren von Laserstrahlung, einmal ohne Wellenfrontkorrektur (Fig. 7) und einmal mit Wellenfrontkorrektur (Fig. 8); und
- Fig. 9 ein zweites Ausführungsbeispiel eines Lasersystems mit Einrichtungen zur Wellenfrontkorrektur.

In den Figuren haben funktionsgleiche Bauteile die gleichen Bezugszeichen. Insoweit entsprechen also das laseraktive Medium 1, der Auskoppelspiegel 2, der Strahlaufweiter 3 und das Gitter 5 beim erfindungsgemäßen Lasersystem gemäß Fig. 3 einem herkömmlichen Aufbau eines Excimerlasers, wie er oben anhand der Fig. 1 erläutert ist. In den Figuren wird der Strahlaufweiter 3 durch ein einziges Prisma symbolisch angedeutet. Tatsächlich bestehen Strahlaufweiter in der Regel aus z.B. mehreren Prismen.

Das beim Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 3 vom Strahlaufweiter 3 kommende Licht weist also eine gekrümmte Wellenfront auf (Fig. 2, rechts). Dieses Licht wird in eine Einrichtung 4 zum Einstellen der Wellenfront eingegeben. Die Einrichtung 4 weist einen deformierbaren Spiegel 4a auf, an dem das Licht zum Gitter 5 reflektiert wird. Weiterhin ist schematisch eine Betätigungsein-

richtung 4b für die Deformierung des Spiegels 4a angedeutet. Bei der Betätigungseinrichtung 4b kann es sich z.B. um eine mechanische Einrichtung zum Deformieren (Verformen) des Spiegels 4a handeln oder auch um eine thermische Einrichtung für diesen Zweck. Z.B. kann damit die Krümmung des Spiegels 4a geändert werden. Das Gitter 5 selektiert Wellenlängen und reflektiert nur einen schmalbandigen Bereich zurück zum Spiegel 4a. Die Strahlung gelangt dann wieder zurück zum Strahlaufweiter 3, wo die Strahlbreite komprimiert wird. Danach passiert die Strahlung wieder die Gasentladungskammer 1 und das laseraktive Medium und wird dort weiter verstärkt. Ein (geringer) Teil der Strahlung wird mittels eines Strahlteilers 6a in Fig. 3 nach oben abgelenkt. Der Strahlteiler 6a ist Teil einer Einrichtung 6 zum Ermitteln der Wellenfront-Krümmung. Nach Fokussierung durch eine Linse 6b aus Schmelzquarz, gelangt die abgezweigte Strahlung auf einen Festkörperbildsensor 6c (z.B. ein CCD-Array). Die Linse 6b hat eine Brennweite f und der Festkörperbildsensor 6c ist in der Brennebene der Linse angeordnet. Der Festkörperbildsensor 6c ermittelt die Fernfeld-Intensitätsverteilung des Strahlungsfeldes im Laserresonator. Die Einrichtung 6 ermittelt also eine Kenngröße für die Qualität der Wellenfront. Soll die Winkelvergrößerung noch verstärkt werden, kann ein zusätzlicher Strahl-Komprimierer im Strahlengang zwischen dem Strahlteiler 6a und der Linse 6b angeordnet werden.

Das vom Festkörperbildsensor 6c gelieferte elektrische Meßsignal bezüglich der Fernfeld-Intensitätsverteilung (und damit bezüglich der Wellenfront-Krümmung) wird an eine Steuerung 7 gegeben, die wiederum mittels eines Rechners die Daten auswertet und entsprechend der erforderlichen Korrektur der Wellenfront die Betätigungseinrichtung 4b so beaufschlagt, daß der Spiegel 4a verformt wird, bis die mit der Einrichtung 6 gemessene Wellenfront-Krümmung einen optimalen (minimalen) Wert hat. Hierzu können z.B. die gemessenen Werte des Festkörperbildsensors mit im Rechner der Einrichtung 7 gespeicherten Werten verglichen werden. Für die Steuerung der Einstelleinrichtung 4 eignet sich insbesondere die Fernfeld-Intensitätsverteilung auf der Achse. Die Einstelleinrichtung 4, also beim Ausführungsbeispiel der verformbare Spiegel 4a, wird so verformt, daß die Fernfeld-Inten-

sitätsverteilung auf der Achse ein Maximum hat. Diese Einstellung wird automatisch durch den Rechner der Steuerung 7 durchgeführt.

Die Fig. 5 und 6 zeigen Meßergebnisse. In den Figuren ist die Intensität (in willkürlichen Einheiten) über der Wellenlänge aufgetragen. Gemessen ist die Intensitätsverteilung im Fernfeld. Fig. 5 zeigt deutlich die Aufspaltung dieser Intensitätsverteilung mit zwei Spitzen (peaks). Diese Aufspaltung wird durch die starke Wellenfrontstörung, insbesondere im Strahlaufweiter, verursacht. Fig. 6 zeigt die Meßergebnisse nach Korrektur der Wellenfrontkrümmung mittels der Korrekturvorrichtungen 6 und 4, die anhand der Fig. 3 erläutert wurden. Die Aufspaltung der Intensitätsverteilung ist im wesentlichen verschwunden, was anzeigt, daß die Wellenfront-Krümmung im wesentlichen zum Verschwinden gebracht worden ist durch Einstellung des Spiegels 4a.

Die Fig. 7 und 8 zeigen die gemessenen Spektren ohne Kompensation der Wellenfrontkrümmung (Fig. 7) und mit Kompensation der Wellenfrontkrümmung (Fig. 8). Auf Grund der fehlenden Wellenfrontkorrektur zeigt das Spektrum von Fig. 7 eine Aufteilung der spektralen Verteilung in zwei getrennte Frequenzen.

Fig. 9 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel eines Lasersystems mit Korrektur der Wellenfront-Krümmung. Bei diesem Ausführungsbeispiel ist ein Teleskop 4' (z.B. vom Cassegrain-Typ) gleichzeitig Teil des Strahlaufweiters und Einrichtung zum Korrigieren einer Wellenfront-Krümmung. Das Teleskop 4' weist zwei hochreflektierende Spiegel 4a', 4b' auf, mit jeweils elliptisch geformten Oberflächen. Das Teleskop 4' hat zwei Funktionen: Zum einen bewirkt es eine Strahlaufweitung in Richtung senkrecht zu den Ritzen des Gitters 5 und zum anderen bewirkt es eine Wellenfrontkorrektur (Begradigung der Wellenfront-Krümmung). Die Wellenfrontkorrektur kann durch Einstellen des Abstandes d zwischen den beiden Spiegeln 4a' und 4b' vorgenommen werden. Im Strahlengang zwischen dem Teleskop 4' ist ein weiterer Strahlaufweiter 3 schematisch dargestellt. Die übrigen Bauteile sind mit gleichen Bezugszeichen anhand der Fig. 3 oben erläutert.

10.12.98

1G-81 274
LAMBDA PHYSIK

SCHUTZANSPRÜCHE

1. Laser zur Erzeugung schmalbandiger Strahlung mit einem laseraktiven Bereich (1), einem Auskoppelspiegel (2), einem Strahlaufweiter (3) und einem wellenlängenselektiven Element (5), auf das Strahlung trifft, gekennzeichnet durch Einrichtungen (6) zum Messen einer von der Wellenfront der Strahlung abhängigen Größe und zum Abgeben eines Meßergebnisses, und Einrichtungen (4, 7) zur Korrektur der Wellenfront in Abhängigkeit von dem Meßergebnis.
2. Laser zur Erzeugung schmalbandiger Strahlung mit einem laseraktiven Bereich (1), einem Auskoppelspiegel (2), einem Strahlaufweiter (3) und einem wellenlängenselektiven Element (5), auf das Strahlung trifft, gekennzeichnet durch eine Einrichtung (4a) zur Korrektur der Wellenfront, die auf das wellenlängenselektive Element (5) auftrifft, wobei die Einstelleinrichtung (4a) hinsichtlich ihrer optischen Eigenschaften veränderbar ist.
3. Laser nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtungen zum Korrigieren der Wellenfront ein in seinen optischen Eigenschaften veränderbares Element (4a) enthalten.
4. Laser nach einem der Ansprüche 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß das veränderbare Element (4a) verformbar ist.
5. Laser nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß das veränderbare Element (4a) ein Spiegel ist.
6. Laser nach einem der Ansprüche 2 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß das veränderbare Element (4a) im Strahlengang zwischen zumindest einem Element (3; 3a) des Strahlaufweiters und dem wellenlängenselektiven Element (5) angeordnet ist.

10.12.99

7. Laser nach einem der Ansprüche 1 oder 3 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtungen (6) zum Messen der Wellenfront einen Festkörper-Bildsensor (6c) aufweisen.
8. Laser nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtungen (6) zum Messen der Wellenfront fokussierende optische Mittel (6b) aufweisen und daß der Festkörper-Bildsensor (6c) in der Fokusebene der abbildenden Elemente liegt.
9. Laser gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Meßeinrichtung (6) als Maß für die Wellenfrontkorrektur die Amplitude im Zentrum der Fernfeld-Intensitätsverteilung genutzt wird.
10. Laser gemäß Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtungen (4') zum Einstellen der Wellenfront ein Teleskop (4a', 4b') aufweisen, insbesondere ein Cassegrain-Teleskop.
11. Laser nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Wellenfront durch Einstellung eines Abstandes (d) von Elementen (4a', 4b') des Teleskops (4') einstellbar ist.
12. Laser nach einem der Ansprüche 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, daß das Teleskop Spiegel (4a', 4b') aufweist zum Reflektieren des Strahlenganges des Lasers und daß die Spiegel entsprechend einem Kegelschnitt geformt sind, insbesondere parabolisch, elliptisch oder hyperbolisch.
13. Laser nach einem der Ansprüche 10 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß zumindest ein Spiegel des Teleskops deformierbar ist.
14. Laser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß er ein Excimerlaser ist.

10.12.98

FIG.1

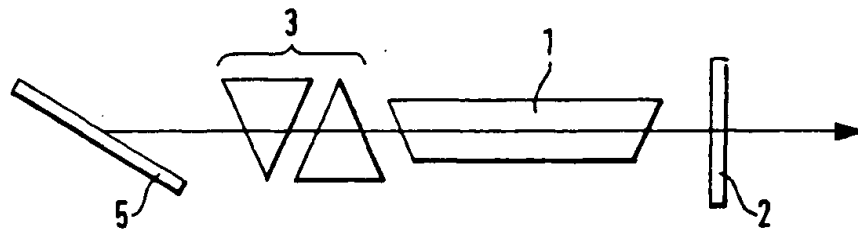
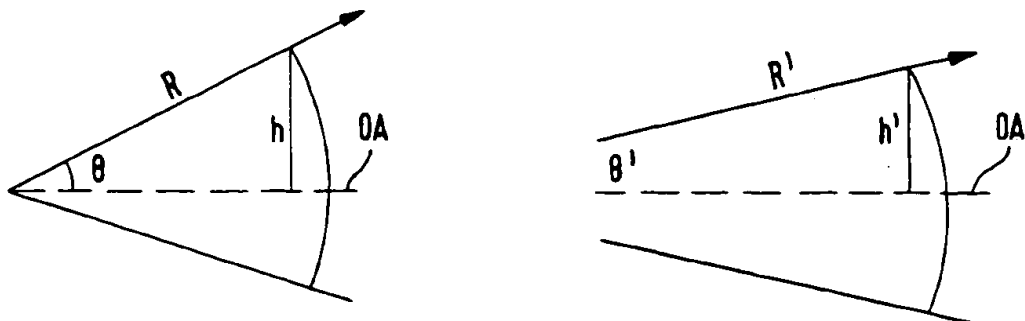


FIG.2



10.12.98

FIG. 3

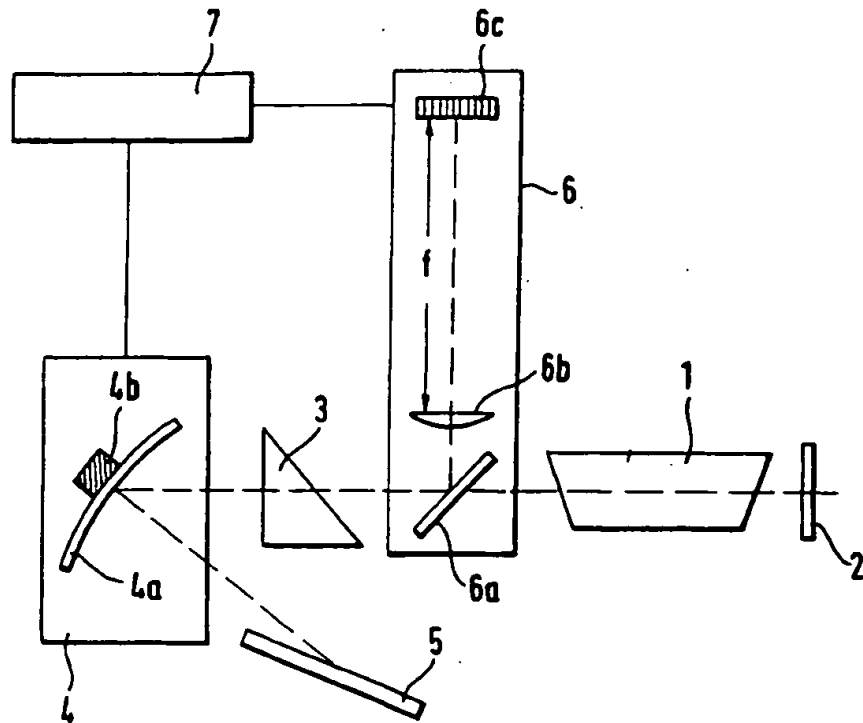
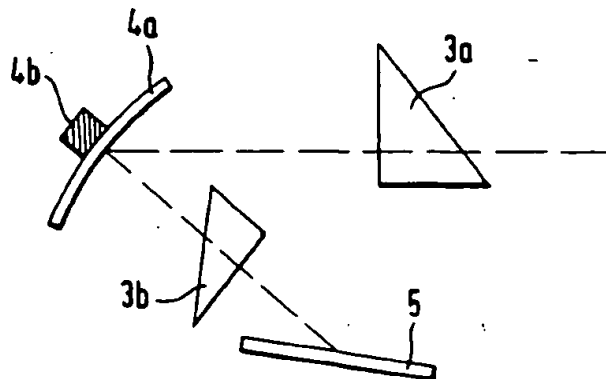


FIG. 4



10.12.98

FIG.5

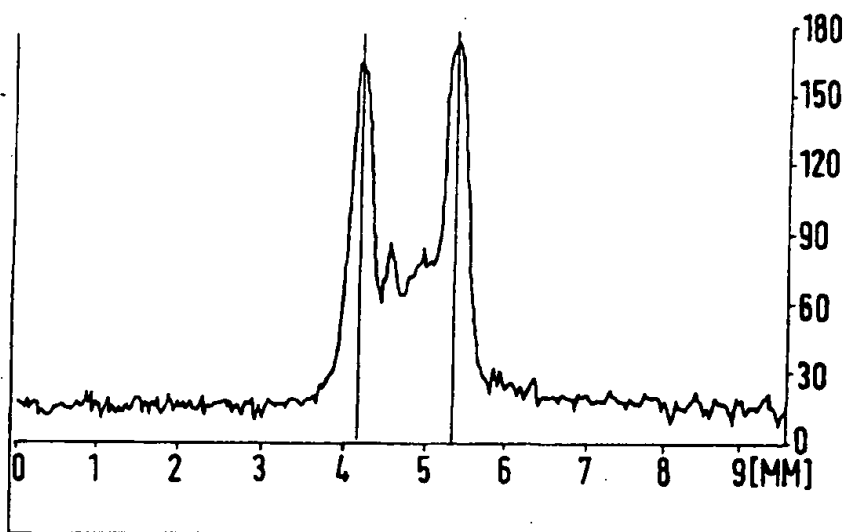
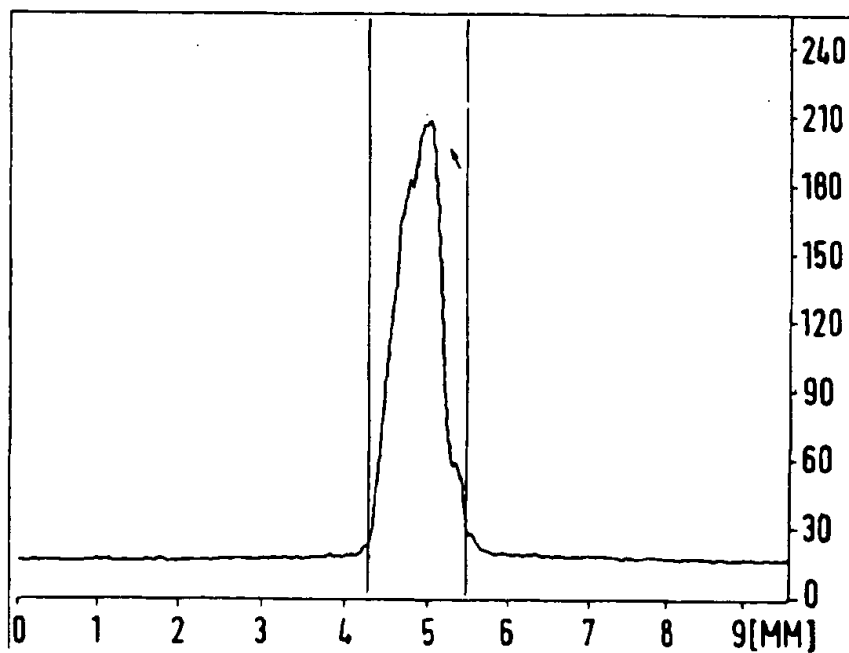


FIG.6



10-12-93

FIG. 7

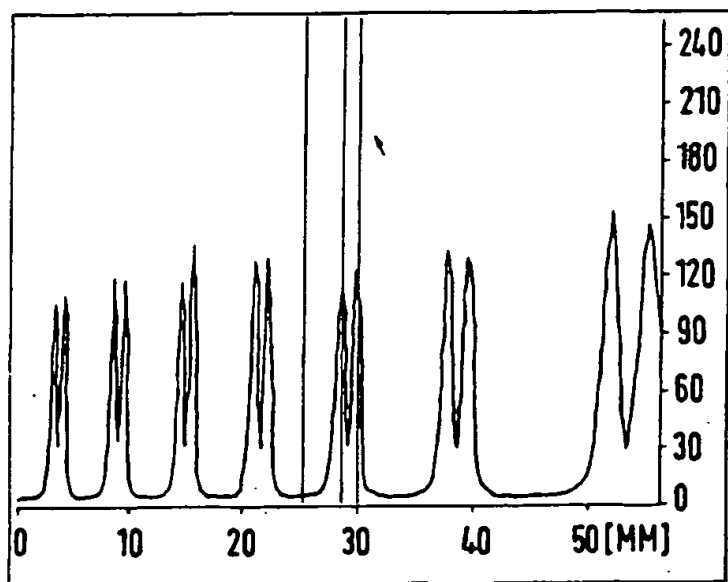
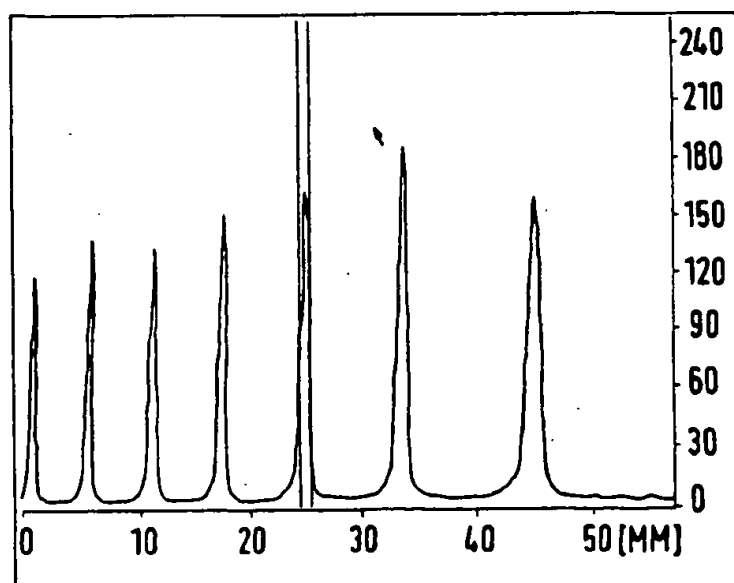


FIG. 8



10.12.98

FIG.9

